第28卷 第1期 工程数学学报 Vol. 28 No. 1
2011年02月 CHINESE JOURNAL OF ENGINEERING MATHEMATICS Feb. 2011

文章编号:1005-3085(2011)01-0007-08

基于分割区域的SAR图像配准方法研究*

张宝尚[1,3], 田 铮[1,2], 延伟东[1]

(1- 西北工业大学应用数学系，西安 710072;
2- 西北工业大学计算机科学技术系，西安 710072; 3- 光电控制技术重点实验室，洛阳 471009)

摘 要: 合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, 简称SAR) 图像受到斑点噪声影响以及成像条件的变化，使得同一场景的两幅SAR图像之间存在很大差异，利用基于边缘特征或灰度信息进行SAR图像配准，难以达到预期效果．基于此，本文提出一种基于分割区域的SAR图像配准方法，该方法首先利用主动轮廓方法对去噪后的SAR图像进行分割，得到图像分割区域；然后提取分割区域的特征；利用区域匹配度函数对图像进行粗匹配；最后利用互信息优化粗匹配下的变换参数，实现由粗到细的图像配准．实验结果验证了算法的有效性．

关键词: 合成孔径雷达图像；主动轮廓；分割区域；互信息；图像配准

分类号: **AMS**(2000) 94A12 **中图分类号**: TP391 **文献标识码**: A

1 引言

图像配准是将不同时间、不同角度或不同传感器所得的两幅或两幅以上的图像进行几何对准的处理过程[1,2]，方法主要有基于区域和基于特征的图像配准．

基于区域的图像配准方法有空间相关法[3]、不变矩法和频域相关法[4] 等，这些方法直接利用图像的灰度信息，配准精度高，但是对图像灰度变化比较敏感，计算复杂度高，对目标的旋转等比较敏感，因而这些方法不能适应SAR图像配准．近几年，基于互信息最大化的相似度度量在SAR图像配准中得到了应用．Xie[5] 直接利用互信息方法将去噪后的SAR图像配准，去噪效果影响算法的鲁棒性且计算量大．Hiep[6] 提出了一种自动分层的SAR图像配准方法，该方法无需对SAR图像进行去噪，但采用插值作为搜索策略计算杂度大．Li[7,8] 采用两种互信息的方法将SAR图像与SPOT图像进行配准．文献 [7] 采用方位互信息改进了原有的互信息方法，但忽略了四个方向上的空间信息．文献 [8] 改进了方位互信息度量，用开窗的方法计算对比度图像，窗口包含局部空间信息较方位互信息方法有效，但计算量大．

基于特征的方法并不直接对灰度级图像进行操作，而是通过提取参考图像和待配准图像上的一些共同的特征，建立特征之间的对应关系，进而实现图像的配准．因此，特征提取和特征匹配就成为基于特征的图像配准技术中的两个关键性步骤[9]．常用的特征有点特征和边缘或轮廓特征．文献 [10,11] 中基于Canny算子得到好的边缘检测结果，但SAR图像存在纹理特性很多连续轮廓会出现断裂现象，LoG算子则会产生很多虚假轮廓．Li[12,13] 用简单的轮廓和弹性轮廓模型分别对光学和遥感图像进行配准．简单的轮廓算法采用链码相关来匹配两幅图像的轮廓．链码相关方法在对于没有明显轮廓的图像配准问题很难奏效，且它对噪声敏感．弹性轮廓用主动轮廓模型，由于SAR图像斑点噪声干扰，仅用轮廓线来做配准信息量少，只有在图像差异不大的情况下才能得到较好的结果．

收稿日期: 2008-09-28. **作者简介**: 张宝尚 (1985年7月生)，男，硕士．研究方向：图像处理与计算机视觉．
***基金项目**: 国家自然科学基金 (60972150; 10926197)；航空科学基金 (20081913006).

针对以上方法用于SAR图像配准的不足之处，本文提出一种基于主动轮廓分割区域的SAR图像配准方法．该方法首先利用主动轮廓模型对预处理后的SAR图像进行分割，得到分割后的若干闭合区域，用区域特征点作为特征并利用区域匹配度函数作度量求得粗匹配下的几何变换参数，最后利用互信息方法在最佳区域匹配对上优化参数，并将图像进行配准．该方法克服了传统边缘检测算子(如Canny、Sobel和LoG等)受SAR图像斑点噪声干扰较大的问题．选取区域对作为SAR图像配准的优势在于：其一，区域包含的信息较轮廓的多，因而不会因为检测轮廓的不准确导致比较差的配准结果；其二，在区域对上用互信息估计参数计算复杂度大大降低，对斑点噪声不敏感，用于SAR图像配准效果好．

本文后续内容安排如下：第2节给出算法的数学模型；第3节介绍了基于分割区域的SAR图像配准的计算步骤．第4节给出了实验结果；最后一部分为结论．

2 主动轮廓与互信息的数学模型

2.1 主动轮廓模型

主动轮廓是由Kass[14]等人于1987年提出的．其基本思想是以构成一定形状的一些控制点为模板(轮廓线)，通过模板自身的弹性形变，与图像局部特征相匹配达到某种意义下的协调，即使得某种能量函数极小化，完成对图像分割，优点在于图像中图形形状不会因控制点的移动而受到影响．

用一组向量序列 $v(s) = (x(s), y(s))$ 代表一个轮廓[12]，其中 $x(s)$ 和 $y(s)$ 为像素的坐标，$1 \leq s \leq N$，N 为像素点的个数．记 $I(x,y)$ 为图像函数，能量函数定义为

$$E = \sum_{s=1}^{N} \big(\alpha(s)E_1 + \beta(s)E_2 + \gamma(s)E_3\big), \tag{1}$$

$$E_1 = |v_s - v_{s-1}| - \frac{1}{N-1}\Big(\sum_{i=2}^{N} |v_i - v_{i-1}|\Big),$$

$$E_2 = |v_{s-1} - 2v_s + v_{s+1}|^2, \quad E_3 = |\nabla I(x,y)|^2,$$

其中(1)式中 $\alpha(s)$, $\beta(s)$ 和 $\gamma(s)$ 为权重因子．E_1 和 E_2 代表了图像内部的能量，E_1 为图像边缘点的一致分布而 E_2 为光滑准则函数；E_3 为图像的梯度．给一个初始轮廓，检测轮廓线上每个点相邻的点，当所检测点使得能量 E 的值减小时，相应轮廓线上点的位置移至该检测点上．迭代直到能量函数达到最小，这样便得到了最终的轮廓线．

2.2 仿射变换模型及区域匹配度函数

本文选用仿射变换模型作为参数变换模型．仿射变换模型

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u & v \\ -v & u \end{pmatrix}\begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \end{pmatrix}, \tag{2}$$

其中 (X,Y) 是参考图像中 A 点的坐标对应待配准图像坐标 A' 为 (X_0, Y_0)，尺度参数 $k = \sqrt{u^2+v^2}$，旋转角度为

$$\theta = \arctan\Big(\frac{v}{u}\Big), \quad -\frac{\pi}{2} < \theta < \frac{\pi}{2},$$

变换模型(2)可表示为 $A = T(A')$．下面介绍区域匹配度函数 C．

设r_1, r_2分别是参考图像和待配准图像中的分割区域，选取两对特征点对带入(2)式即可求得变换函数$T(\cdot)$．将变换函数$T(\cdot)$作用于r_2得到$r_3 = T(r_2)$．分别取矩形$M_0 \times N_0$和$M_1 \times N_1$，将r_1和r_3包含在内，令

$$M = \max(M_0, M_1), \quad N = \max(N_0, N_1).$$

定义如下两个函数

$$f_0(x,y) = \begin{cases} 1, & (x,y) \in r_1, \\ 0, & (x,y) \notin r_1, \end{cases} \tag{3}$$

$$f_1(x,y) = \begin{cases} 1, & (x,y) \in r_3, \\ 0, & (x,y) \notin r_3, \end{cases} \tag{4}$$

则分割区域r_1和r_2的匹配度函数为

$$\begin{aligned} C(r_1, r_2) &= \frac{\sum\limits_{x=1}^{M}\sum\limits_{y=1}^{N} f_0(x,y) f_1(x,y)}{\sqrt{\Big[\sum\limits_{x=1}^{M}\sum\limits_{y=1}^{N} f_0^2(x,y)\Big]}\sqrt{\Big[\sum\limits_{x=1}^{M}\sum\limits_{y=1}^{N} f_1^2(x,y)\Big]}} \\ &= \frac{\sum\limits_{x=1}^{M}\sum\limits_{y=1}^{N} f_0(x,y) f_1(x,y)}{\sqrt{\Big[\sum\limits_{x=1}^{M}\sum\limits_{y=1}^{N} f_0(x,y)\Big]}\sqrt{\Big[\sum\limits_{x=1}^{M}\sum\limits_{y=1}^{N} f_1(x,y)\Big]}}. \end{aligned} \tag{5}$$

上式第二个等号由(3),(4)得到，分子代表r_1和r_3重合区域的点的个数，分母根式中为区域r_1和r_3点个数的乘积．显然$C(r_1, r_2)$的范围在$[0,1]$之间．当r_1和r_2是一个匹配区域，且满足$r_1 = T(r_2)$时，函数$C(r_1, r_2)$达到最大值1．但是在实际匹配中，并不能得到理论值1，这主要由于两幅图像对应分割区域本身可能并不是完全重合的．若区域r_1和r_2是匹配区域，即r_1和r_3重合部分较多，则求得的$C(r_1, r_2)$值越大；另一方面$C(r_1, r_2)$的值越大，即r_1和r_3重叠部分越多，说明区域r_1和r_2是匹配区域的概率越大．因此本文选取使得$C(r_1, r_2)$达到最大的那对匹配区域作为最佳区域对作为细匹配．

2.3　互信息

互信息(Mutual information, MI)[5,15]是Shannon在1948年关于信息论的论文中提出来的一个重要概念．互信息是用来度量两个随机变量之间的相似程度．对于两个随机变量A, B，它们的熵分别是$H(A)$, $H(B)$和$H(A,B)$，概率分布分别为$P_A(a)$和$P_B(b)$，联合概率分布为$P_{A,B}(a,b)$，则其互信息$MI(A,B)$为

$$MI(A,B) = H(A) + H(B)H(A,B) = \sum_{a,b} P_{AB}(a,b) \log \frac{P_{AB}(a,b)}{P_A(a)P_B(b)}. \tag{6}$$

互信息是一种图像相似性度量．在基于互信息的图像配准中，将像素值看作是某个连续随机变量的采样，利用这些离散采样值估计出单个图像的概率密度和两幅图像的联合概率密度，再求出图像的互信息．两幅图像配准得越好，则它们的相关性越大，得到的互信息值也就越大，反

之，两幅图像互信息值越大，说明它们之间的相关性越大，则图像配准得越好．由此可见，基于互信息量测度下的图像配准可以表示为

$$T^*(\cdot) = \arg\max MI\big(A, T(B)\big), \tag{7}$$

其中 $T^*(\cdot)$ 为图像变换函数．

互信息配准方法目前被公认为是配准精度和鲁棒性最好的配准方法之一．

3 基于分割区域SAR图像配准的计算步骤

本节给出基于分割区域SAR图像配准的计算步骤：

步骤1 将参考图像与待配准图像分别进行滤波预处理；

步骤2 利用主动轮廓模型分割滤波后图像，得到两幅图像的分割区域；

步骤3 提取图像分割区域的特征；

步骤4 利用区域匹配度函数将图像进行粗匹配，得到匹配区域及初步变换参数；

步骤5 利用互信息模型优化参数，得到细匹配变换参数将图像进行配准．

步骤1选用高斯滤波器对SAR图像进行滤波，步骤2应用2.1节介绍的主动轮廓模型将图像分割并得到闭合区域．步骤3为提取分割区域内部特征过程，用区域的质心以及Harris角点检测算法提取分割区域的角点作为特征点[16]，利用2.2节算法求取粗匹配下的变换参数及最佳区域匹配对，得到最佳匹配对及变换参数，再利用互信息方法在最佳匹配区域上优化粗配准参数．由2.3节知使互信息达到最大求得的配准参数即是最终优化参数．用灰度直方图作为图像的概率密度估计，通过计算两幅图像的灰度联合直方图来估计联合概率密度．优化方法采用Powell多参数优化算法，由于只对最佳区域对实现优化算法，这样有效地减少了计算量．

4 实验结果

4.1 SPOT图像和Landsat图像配准结果

图像来自文献[13]，图1是利用主动轮廓模型分割两幅图像的结果．图1中(a)和(b)若干小区域未检测为分割区域，这是由于实现分割算法时剔除了小区域，选取区域像素个数大于图像本身像素个数1/100(可调节)的区域作为分割区域．图2给出了分割区域特征与配准结果．选取SPOT图像为参考图像，Landsat图像作为待配准图像进行配准．从图2可以看出仅用图像的质心作为特征点匹配图像的不足之处在于对应的分割区域并不一定完全重合，如图1中区域(c)只是待配准图像区域(i)中的一部分，它们的质心在几何上是没有对应关系的．因此本文选取角点特征与区域质心一并作为粗匹配的特征更加合理．最终得到配准的变换参数为尺度参数为

$$k = 1.371, \quad \theta = 17.9221^\circ, \quad \Delta X = -59.81614, \quad \Delta Y = 16.535.$$

4.2 SAR图像的配准结果

图3是对两幅SAR图像进行配准的结果，其中(b)和(e)分别为分割区域及特征，(b)图为五个区域，而(e)图则有7个分割区域，但两幅图右侧的四块对应区域都被检测出来，这样对配准结果并无影响，因为只需检测出一对匹配的区域即可完成算法．由第三节计算步骤求得图像细匹配的变换参数为

$$k = 0.7234, \quad \theta = 12.5077^\circ, \quad \Delta X = 34.8267, \quad \Delta Y = 88.5206.$$

图4是对另两幅SAR图像进行配准的结果，其中参考图像(a)大小为100 × 100，待配准图像(b)的大小为128 × 128，利用边缘算子在检测这两幅SAR图像时都无法得到准确的轮廓(c)和(d)，(e)和(f)给出的分割结果和特征反应了本文算法的有效性，最终得到图像细匹配的变换参数为

$$k = 0.7813,\quad \theta = 13.1780^\circ,\quad \Delta X = 12.3850,\quad \Delta Y = -9.2483.$$

5　结论

在基于特征的配准图像中，轮廓方法的优点是能够较好地反应图像本身的信息，计算复杂度低．但是传统的算子提取SAR图像边缘时，提出的轮廓线往往是断裂的，甚至会得到虚假轮廓，直接用轮廓做配准很难达到满意的结果．本文利用主动轮廓分割图像，在得到分割结果的情况下，不直接提取边缘作特征来配准，而是把得到的区域作为特征，先进行粗匹配得到匹配的区域对，再利用互信息得到细配准的结果．两幅SAR图像配准和遥感图像配准的结果均表明算法是有效的．由于算法本身是基于先分割，再配准，所以寻求较好的分割模型作为配准前提是笔者今后致力研究的问题．

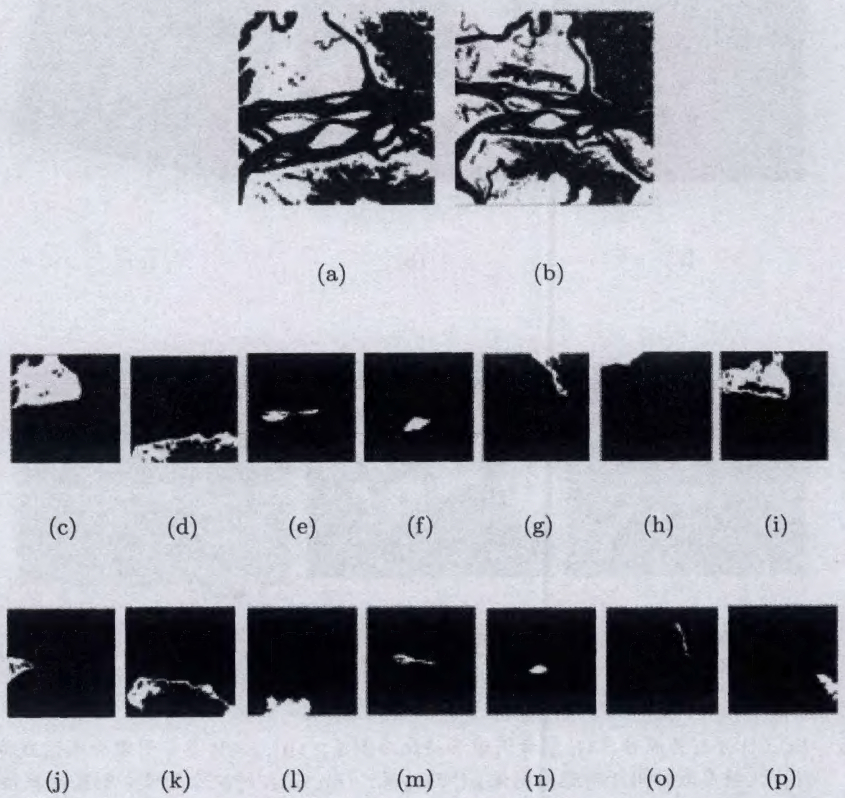
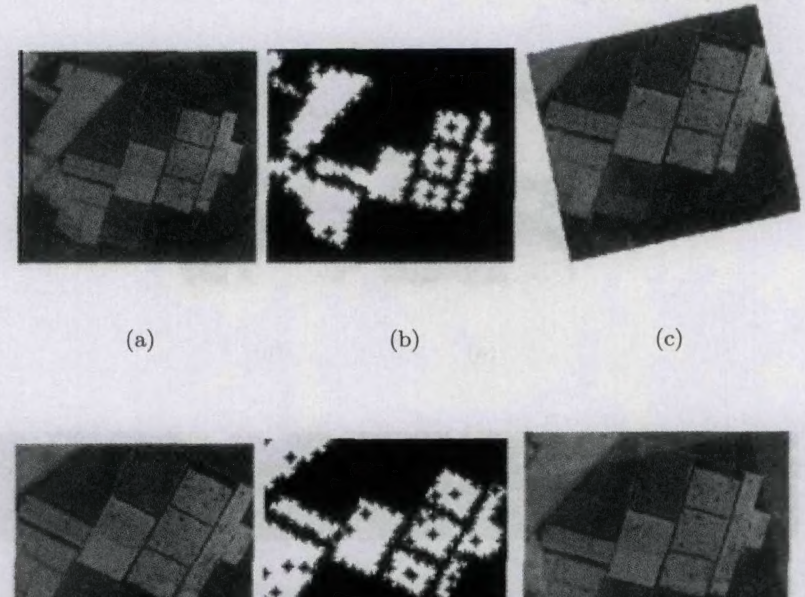


图1:　(a): SPOT图像；(b): Landsat图像；(c)~(g): SPOT图像的分割区域；(h)~(p): Landsat图像的分割区域

(a) (b) (c) (d)

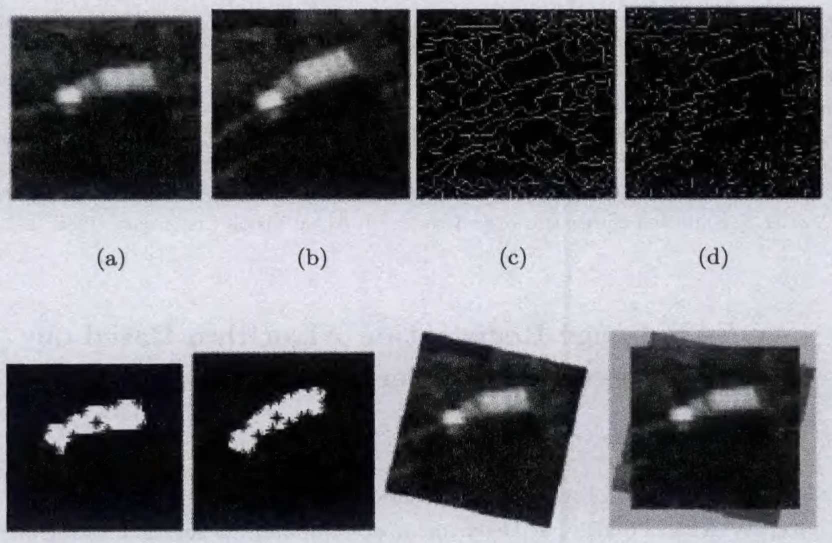
图 2: (a): SPOT 图像分割区域特征; (b): Landsat 图像分割区域特征;
(c): 变换参数作用于 Landsat 图像的结果; (d): 配准结果



(a) (b) (c)

(d) (e) (f)

图 3: (a),(d) 分别为原始 SAR 参考图像和待配准图像; (b): SAR 参考图像分割区域特征;
(c): 变换参数作用于待配准图像 (d) 的结果; (e): SAR 待配准图像分割区域特征;
(f): 配准结果



(a) (b) (c) (d) (e) (f) (g) (h)

图 4: (a),(b) 分别为原始SAR参考图像和待配准图像；(c): Canny 算子检测待配准图像 (b) 的结果；(d): LoG 算子检测图像 (b) 的结果；(e): SAR 参考图像分割区域特征；(f): SAR 待配准图像分割区域特征；(g): 变换参数作用于待配准图像 (b) 的结果；(h): 配准结果

参考文献：

[1] Brown L G. A survey of image registration techniques[J]. ACM Computing Surveys, 1992, 24(4): 325-376

[2] Zitova B, Flusser J. Image registration methods: a survey[J]. Image and Vision Computing, 2003, 21(11): 977-1000

[3] Ardeshir Goshtasby A. 2-D and 3-D Image Registration: for Medical, Remote Sensing, and Industrial Applications[M]. New York: Wiley-Interscience, 2005

[4] Srinivasa B, *et al.* An FFT-based technique for translation rotation and scale-invariant image registration[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1996, 5(8): 1266-1271

[5] Xie H, *et al.* Mutual information based registration of SAR[J]. IEEE International IGARSS Proceedings, 2003, (6): 4028-4031

[6] Hiep Q T, *et al.* Automatic registration of synthetic aperture radar (SAR) images[J]. IEEE International IGARSS Proceedings, 2004, (6): 3864-3867

[7] Li X S, *et al.* A novel registration method for SAR and SPOT images[J]. IEEE International Conference on Image Processing, 2005, (2): 213-216

[8] Li X S, *et al.* SAR and SPOT image registration based on mutual information with contrast measure[J]. IEEE International Conference on Image Processing, 2007, (2): 429-432

[9] 康欣，韩崇昭，杨艺. 基于结构的SAR图像配准[J]. 系统仿真学报，2006, 18(5): 222-225
Kang X, Han C Z, Yang Y. Structure-driven SAR image registration[J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(5): 222-225

[10] Touzi R, *et al.* A statistical and geometrical edge detector for SAR images[J]. IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing, 1988, 26(6): 764-773

[11] Bovik A C. On detecting edges in speckle imagery[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1988, 36(10): 1618-1627

[12] Li H, *et al.* Optical-to-SAR image registration using the active contour model[J]. IEEE Transactions on Signals, Systems and Computers, 1993, (1): 568-572
[13] Li H, *et al.* A contour-based approach to multisensor image registration[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1995, 4(3): 320-334
[14] Kass M, *et al.* Snakes-active contour models[J]. International Journal of Computer Vision, 1987, 1(4): 321-331
[15] Cover T M, *et al.* Elements of Information Theory[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003
[16] Harris C, *et al.* A combined corner and edge detector[J]. Alvey Vision Conference, 1988: 147-152

An SAR Image Registration Algorithm Based on Segmentation-derived Regions

ZHANG Bao-shang[1,3], TIAN Zheng[1,2], YAN Wei-dong[1]

(1- Department of Applied Mathematics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072; 2- Department of Computer Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072; 3- Science and Technology on Electro-optic Control Laboratory, Luoyang 471009)

Abstract: Due to the speckle imaging and the impact of the different conditions, the synthetic aperture radar (SAR) images may differ considerably under the same scene. However, using the method of the gray or edge feature, the results of SAR image registration may not be ameliorated. Therefore, we propose a method based on the segmentation-derived region to register the SAR image. After denoising the SAR images, the segmentation regions can firstly be obtained by using the active contour image segmentation. Moreover, we extract the feature of segmentation-derived region, using the function of regional the matching degree to carry out its rough match. Finally, by using mutual information, we optimize transformation parameters such that a coarse to fine image automatic registration can be implemented. The experimental results indicate that the algorithm is effective.

Keywords: synthetic aperture radar; active contour; segmentation-derived region; mutual information; automatic registration

Received: 28 Sep 2008. **Accepted:** 19 Feb 2009.
Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (60972150; 10926197); the National Aerospace Science Foundation of China (20081913006).